

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-129-137>



Поступила 23.02.2026

Поступила после рецензирования 20.03.2026

Принята в печать 26.03.2026

© Гладышева М. С., Молодкина Н. Р., 2026

<https://www.fsjour.com/jour>

Обзорная статья

Открытый доступ

ТРЕНДЫ И ТЕМАТИЧЕСКИЕ КЛАСТЕРЫ ИССЛЕДОВАНИЙ *HERMETIA ILLUCENS* В ЦИРКУЛЯРНОЙ БИОЭКОНОМИКЕ

Гладышева М. С.*, Молодкина Н. Р.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

Hermetia illucens,
био конверсия,
органические
отходы, валоризация,
циркулярная
биоэкономика,
библиометрический
анализ

Рост численности населения и прогнозируемый дефицит животного белка к 2050 году диктуют необходимость поиска эффективных методов утилизации органических отходов, объем которых достигает 1,3 млрд тонн ежегодно. Личинки *Hermetia illucens* (чёрная львинка) рассматриваются как ключевой элемент циркулярной биоэкономики, способный трансформировать низкоценную органику в высококачественную биомассу. Целью данной работы является анализ мировых исследовательских трендов для определения стратегий преодоления технологического разрыва в промышленной био конверсии. На основе протокола PRISMA сформирована база из 283 публикаций из базы данных Scopus за 2010–2025 гг., которая подверглась кластерному и временному анализу в программной среде VOSviewer. В ходе исследования выявлено четыре тематических кластера, структурирующих область знаний от фундаментальных дескрипторов до прикладных моделей валоризации. Установлено, что наиболее динамично развивающийся сегмент связан с концепцией глубокой переработки органических отходов (в т.ч. пищевых) личинками мухи чёрной львинки для получения продуктов с высокой добавленной стоимостью. Анализ временных трендов показал смещение фокуса с простого сокращения объёмов отходов к изучению симбиотического взаимодействия личинок с микробиомом и оптимизации переработки специфических отходов. На основе полученных данных сделан вывод, что ключевым барьером для индустрии остается нестабильность биохимического состава продукции, что зависит как от не контролируемого входного субстрата, так и от преобладания ручного культивирования. В качестве решения предлагается интеграция автоматизированных систем культивирования, что позволит управлять метаболической пластичностью личинок и обеспечит стабильный выход биоактивных субстанций при переработке различных типов органических субстратов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках темы НИР № 625137 «Экотехнологические подходы к устойчивой переработке и валоризации органических отходов» (Университет ИТМО).

Received 23.02.2025

Accepted in revised 20.03.2026

Accepted for publication 26.03.2026

© Gladysheva M. S., Molodkina N. R., 2026

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

TRENDS AND CLUSTERS OF *HERMETIA ILLUCENS* RESEARCH IN CIRCULAR BIOECONOMY

Marina S. Gladysheva*, Nelli R. Molodkina

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

KEYWORDS:

Hermetia illucens,
Bioconversion,
Organic waste,
Waste valorization,
Circular bioeconomy,
Bibliometric analysis

ABSTRACT

Population growth and the projected shortage of animal protein by 2050 necessitate the development of effective methods for recycling organic waste, which amounts to 1.3 billion tons annually. *Hermetia illucens* (black soldier fly) larvae are recognized as a key element of the circular bioeconomy, capable of transforming low-value organic matter into high-quality biomass. The aim of this study is to analyze global research trends to identify strategies for overcoming the technological gap in industrial bioconversion. Based on the PRISMA protocol, a database of 283 Scopus publications (2010–2025) was formed and subjected to cluster and temporal analysis using the VOSviewer software environment. The study identified four thematic clusters structuring the knowledge field from fundamental descriptors to applied valorization models. It was established that the most dynamically developing segment is associated with the concept of deep processing of organic waste (including food waste) by black soldier fly larvae to obtain high-value-added products. Temporal trend analysis revealed a shift in focus from simple waste reduction toward studying the symbiotic interaction between larvae and the microbiome, as well as optimizing the processing of specific waste streams. The findings indicate that the primary barrier for the industry remains the instability of the biochemical composition of the products, which depends on both uncontrolled input substrates and the dominance of manual rearing. The integration of automated cultivation systems is proposed as a solution, enabling management of larval metabolic plasticity and ensuring a stable yield of bioactive substances during the processing of various organic substrates.

FUNDING: The article was published as part of the research topic No. 625137 “Ecotechnological approaches to sustainable processing and valorization of organic waste” (ITMO University).

1. Введение

Согласно прогнозам, к 2080 году население планеты достигнет 10,4 млрд человек, что повлечет за собой резкий рост спроса на продовольствие и, как следствие, увеличение объемов органических отходов [1]. Ежегодно в мире выбрасывается около 1,3 млрд тонн продуктов, что составляет треть всего производимого продо-

вольствия [2]. В Российской Федерации ежегодно образуется около 82,3 млн тонн органических отходов, из которых до 90% направляется на полигонное захоронение [3]. Это приводит не только к исключению ценных нутриентов из трофологических цепей, но и к другим экологическим проблемам. В рамках решения данных проблем личинки мухи чёрная львинка (*Hermetia illucens*) рассматриваются

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гладышева, М. С., Молодкина, Н. Р. (202X). Тренды и тематические кластеры исследований *Hermetia illucens* в циркулярной биоэкономике. *Пищевые системы*, 9(1), 129–137. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-129-137>

FOR CITATION: Gladysheva, M. S., Molodkina, N. R. (202X). Trends and clusters of *Hermetia illucens* research in circular bioeconomy. *Food Systems*, 9(1), 129–137. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-129-137>

как ключевой участник циркулярной биоэкономики, способный к высокоэффективной биоконверсии субстратов, образующихся в результате продовольственного процесса.

Личинки *Hermetia illucens* признаны ключевым организмом циркулярной биоэкономики благодаря их способности трансформировать низкоценную органику в богатую нутриентами биомассу (до 40–63% сырого протеина и 15–40% жира в сухом веществе), сокращать объем отходов на 50–70% за короткий цикл (10–15 дней), снижать выбросы парниковых газов (например, метана), которые неизбежны при анаэробном разложении органики на полигонах [1,4].

Помимо роста органических отходов, связанных с интенсификацией человеческой деятельности, также, по данным FAO (Food and Agriculture Organization) спрос на животный белок вырастет на 50–70% к 2050 году [5]. Говоря о теме роста потребностей в животном белке нельзя не отметить, что традиционные источники белка для аквакультуры и животноводства (рыбная мука и соя) становятся все более дорогостоящими и экологически неустойчивыми. В индустрии животноводства затраты на корма составляют от 60% до 80% от общих производственных расходов. Данное положение диктует острую необходимость поиска альтернативных, высококачественных и доступных ингредиентов, например, таких как энтомопротеин [6].

Исследования последних десятилетий демонстрируют широту прикладного потенциала *Hermetia illucens*. Ранние работы фокусировались на фундаментальной возможности биоконверсии пальмового шрота [7] и навоза [8]. Современный вектор сместился в сторону получения продуктов с высокой добавленной стоимостью, таких как биодизель [9,10], специализированные корма для аквакультуры и птицеводства [11,12], а также биополимеры — хитин и хитозан [13,14]. Особый интерес вызывают антимикробные пептиды (АМП), которые способна производить личинка чёрной львинки. Актуальность их изучения обусловлена глобальным кризисом резистентности патогенов к традиционным антибиотикам. У *Hermetia illucens* идентифицировано одно из крупнейших семейств генов АМП среди насекомых [15,16], включая дефензины и цекропины, способные физически разрушать мембраны таких патогенов, как *E. coli* и *S. Aureus* [17,18]. Тем не менее, несмотря на достаточный массив научных данных, доказывающих интерес к теме биоконверсии органических (в т.ч. пищевых) отходов, в индустрии сохраняется технологический разрыв: преобладающее ручное лоточное культивирование ведет к нестабильности биохимического состава личинок и дороговизне данной технологии, что препятствует её повсеместному внедрению.

2. Объекты и методы

В качестве объекта исследования были выбраны научные публикации мирового сообщества, индексируемые в международной базе данных Scopus. Формирование базы данных происходило из англоязычных статей при использовании в поисковом запросе ключевых слов, таких как *Hermetia illucens*, black soldier fly, circular bioeconomy, bioconversion, antimicrobial peptides, chitin, lipids, protein, frass, automation. Использование перечисленных терминов позволило сформировать репрезентативную выборку, отражающую глобальные тенденции в рассматриваемой области.

Последующая систематизация полученной выборки производилась по схеме PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses / Предпочтительные элементы отчетности для систематических обзоров и метаанализов), разработанная для улучшения отчетности по систематическим обзорам. По данной схеме авторами работы был выполнен отсев найденных статей по следующим критериям:

- ❑ база данных для поиска статей: Scopus (п. 6 Information sources);
- ❑ временной период: анализировались статьи с 2010 по 2025 гг. (п. 5 Eligibility criteria);
- ❑ тип документа: статьи и материалы конференций (п. 5 Eligibility criteria);
- ❑ направление используемых исследований: производился поиск по ключевым словам, используя поисковый запрос (“*Hermetia illucens*” OR “black soldier fly”) AND (“circular bioeconomy” OR “bioconversion”) AND (“antimicrobial peptides” OR “chitin” OR “melanin” OR “lipids” OR “protein” OR “frass” OR “zoohumus” OR “automation” OR “bioreactor”) (п. 7 Search strategy);
- ❑ технический скрининг статей: наличие в собранной базе аннотации, ключевых слов авторов, а также доступ к полному тексту статей (п. 8 Selection process);
- ❑ тематический скрининг статей: включение работ, которые рассматривали личинок *Hermetia illucens* как агентов биоконверсии органических (преимущественно пищевых) отходов (п. 5 Eligibility criteria).

Данная последовательность действий позволила создать рабочую базу данных, которая в дальнейшем подверглась обработке при помощи программного обеспечения для выделения кластеров. После обработки статей по данной схеме из первоначальной выборки, выделенной из базы данных Scopus в количестве 463 штук, в итоговой выборке получилось 283 статьи. На Рисунке 1 представлена схема составления итоговой базы данных.

Для обработки полученных метаданных 283 отобранных статей использовалось программное обеспечение VOSviewer (версия 1.6.19, Nees Jan van Eck и Ludo Waltman, Нидерланды). Основным методом исследования для определения кластеров был выбран анализ встречаемости ключевых слов автора (Keyword Co-occurrence), который позволяет визуализировать структуру предметной области и связи между её элементами. Поскольку во время технического скрининга авторами было отмечено, что некоторые ключевые слова могут встречаться как полным написанием, так и аббревиатурой (например, «antimicrobial peptides» и «AMPs») или наличие терминов-синонимов (например, «BSFL», «*Hermetia illucens*» и «black soldier fly larvae»), то перед запуском алгоритмов программы был создан файл-тезаурус, что позволило сделать построенные карты более точными и не содержащими дублирующей по смыслу информации.

В качестве параметров анализа в программном обеспечении использовались подсчет силы связи между терминами методом полного подсчета (Full counting). Для нормализации силы связи между узлами сети применялся метод фракционирования (Fractionalization). Выбор данного метода обусловлен необходимостью минимизировать влияние отдельных публикаций с аномально большим количеством ключевых слов, что обеспечивает более равномерное распределение элементов в кластерах и повышает интерпретируемость связей в сетевой визуализации. Минимальный порог частоты встречаемости термина (Minimum number of occurrences) был установлен на уровне 5-ти раз, что позволило сфокусировать анализ на наиболее устойчивых исследовательских трендах.

На заключительном этапе подготовки рукописи авторами работы использовались технологии генеративного искусственного интеллекта (Notebook LM, разработчик Google Labs) исключительно для улучшения языкового оформления: в целях изменения стиля подачи, устранения грамматических, пунктуационных ошибок. Авторы несут полную ответственность за содержание и оригинальность представленной работы.



Проанализировав Кластер 1, можно идентифицировать его как «Валоризация органических отходов и продукты глубокой переработки», поскольку он охватывает термины, показывающие своевременный переход от простой утилизации отходов к концепции глубокой переработки биомассы для получения продуктов высокого передела. Также стоит отметить концепцию биорефайнинг, которая встречается в зарубежных статьях [19–21] и означает систему глубокой, комплексной переработки органического сырья, где насекомое выступает в роли «биологического реактора», превращающего низкоценные отходы в целый ряд коммерчески значимых продуктов: белок, жиры (сырьё для биодизеля), хитин и антимикробные пептиды.

Данный кластер является наиболее масштабным в рамках данной выборки и позволяет сделать вывод об актуальности перехода от простой утилизации отходов к стратегии их комплексной трансформации в высокотехнологичные продукты.

Говоря о продуктах с высокой добавленной стоимостью, чаще всего упоминаются энтомопротеин, липиды (включая лауриновую кислоту), антимикробные пептиды, хитин-меланиновый комплекс. Анализируя сформированную базу данных, можно отметить, что чаще всего в качестве целевого продукта упоминаются энтомопротеин и аминокислоты — 142 статьи, что составляет 50,2% от всей выборки и подтверждает статус базового продукта индустрии. Исследования направлены на замену рыбной муки и соевого шрота в кормах для АПК и аквакультуры. Липиды фигурируют в 98 статьях (34,6% от всех статей в выборке), где особое внимание уделено лауриновой кислоте (C12:0). Антимикробные пептиды стали предметом 43 исследований (15,2% от всех статей в выборке), причем большая часть работ относится к периоду 2021–2025 гг., что говорит о высоком интересе к данной тематике в настоящее время. Хитин-меланиновый комплекс упоминается в 31 статье (10,9% от всех статей в выборке), несмотря на меньшее количество работ, это направление демонстрирует высокую динамику сложности: от простой экстракции хитина к созданию биопластиков.

Анализ связей в Кластере 1 подтверждает глобальное смещение исследовательского вектора от простой утилизации органики к стратегии её глубокой биотехнологической валоризации. Реализация концепции энтомологического биорефайнинга позволяет рассматривать получение ряда продуктов с высокой добавленной стоимостью — антимикробных пептидов, биодизеля и энтомопротеина, что обеспечивает переход к устойчивой модели циркулярной биоэкономики.

Кластер 2 позволяет сфокусироваться на изучении внутренних физиологических процессов личинок и качества побочных продуктов биоконверсии, связывая фундаментальную биологию насекомого с практической ценностью получаемых ресурсов.

Исследования в данном направлении показывают, что личинки *H. illucens* представляют собой сложную симбиотическую систему [22]. Также установлено, что личинки активно используют ресурсы своего кишечного микробиома. Бактерии семейства *Bacillaceae* играют решающую роль в деградации трудноперевариваемых растительных полимеров (целлюлозы и лигнина) [23]. Установлено, что микробиотическое сообщество способно синтезировать до 35% необходимых личинке незаменимых аминокислот при их дефиците в субстрате [24].

Также в рамках данного кластера акцент смещается на саму биомассу личинок, где одним из направления работ может являться изучение метаболической пластичности личинок — их способности подстраивать биохимию организма и активность ферментов под нутриентный профиль субстрата [25]. Процесс накопления веществ зависит от того, является ли конкретный нутриент генетически детерминированным или гибко реагирующим на состав диеты [26].

Анализ сетевых взаимодействий в рамках Кластера 2 доказывает, что эффективность энтомологической биоконверсии детерминируется не только биологическими факторами, но и синергетическим взаимодействием *H. illucens* с ассоциированным микробиомом. Личинки функционируют как сложная симбиотическая система, способная активно формировать специфические функциональные микроорганизмы для интенсификации деградации трудноперевариваемых растительных биополимеров. Установленное взаимодействие обеспечивает высокую метаболическую пластичность, что открывает возможности для перехода к направленному культивированию и получению биомассы с заданными биохимическими характеристиками (в пределах нормы реакции организма).

Кластер 3 объединяет прикладные исследования, сфокусированные на оценке практической эффективности процесса биоконверсии. Основное внимание здесь уделяется количественным метрикам переработки и оптимизации условий содержания личинок для достижения максимальных темпов утилизации отходов. Согласно данному направлению исследований, личинки *H. illucens* призна-

ны высокоэффективным инструментом для валоризации пищевых остатков домохозяйств и предприятий общественного питания [27, 28]. Исследования показывают, что кухонные отходы являются одним из наиболее подходящих субстратов для развития личинок, обеспечивая высокую скорость набора массы [29,30], однако, также упоминается, что сезонное влияние на состав данных отходов влияет на стабильность процесса биоконверсии [27,31]. Данное положение требует внесения дополнительных добавок в состав субстрата и установление технологических параметров проведения процесса.

В качестве количественных метрик используют показатели роста и развития, где анализируют взаимосвязь между исходным количеством личинок в начале процесса конверсии, влажностью субстрата и такими показателями, как коэффициент конверсии корма (FCR), удельная скорость роста и финальная масса личинки [32–36]. Установлено, что при оптимальных параметрах личинки способны сокращать объем и массу органических отходов на 50–70% за короткий цикл в 10–15 дней [37]. Поскольку для достижения данных параметров необходимо совершить переход к автоматизированному культивированию личинок при контролируемых параметрах, это становится одним из основных исследовательских направлений.

Также исследования, относящиеся к данному кластеру, позиционируют энтомологическую переработку как более быструю и экологически безопасную альтернативу традиционному компостированию. Рассматриваются комбинированные подходы, такие как двухстадийный процесс биоконверсия-компостирование, где личинки перерабатывают основную массу органики, а последующее созревание остатка происходит методами классического компостирования, что позволяет получить стабилизированное органическое удобрение высокого качества [38,39].

Анализ связей в Кластере 3 подтверждает, что мировой научный интерес в этой области перешел от простой констатации факта поедания отходов к технологическому нормированию. Выявленные закономерности роста и сокращения отходов служат основой для масштабирования технологии: от лабораторных экспериментов к промышленным системам, где критически важным становится контроль микроклимата.

Кластер 4 является наименьшим и завершающим кластером в структуре сетевой визуализации, несмотря на свою лаконичность, выполняет критическую функцию интегратора всего исследовательского поля, поскольку представляет собой центр знаний, на котором базируются все прикладные направления. Данную роль кластер играет за счет системообразующих дескрипторов, которые выступают связующим звеном между изучением жизненного цикла *H. illucens* и разработкой систем промышленной биоконверсии органических субстратов.

3.1.1. Продукты, получаемые в процессе биоконверсии пищевых отходов с использованием *H. Illucens*

Анализ статей, представленных в кластере 1, показывает, что биоконверсия пищевых отходов с использованием *H. Illucens* позволяет получать достаточное количество продуктов с высокой добавленной стоимостью. Личинки и предкуколки *H. illucens* характеризуются высоким содержанием сырого протеина, варьирующимся в диапазоне от 32% до 63% на сухое вещество (СВ) [40]. Аминокислотный профиль муки чёрной львинки является сбалансированным и сопоставимым с рыбной мукой высокого качества, при этом в биомассе преобладают такие аминокислоты, как лейцин, лизин и валин [41]. Ряд работ показывает, что энтомопротеин может успешно замещать соевый шрот и рыбную муку в рационах птиц, свиней и объектов аквакультуры без снижения показателей роста [42,43].

Липидная фракция является наиболее метаболически пластичным параметром и может составлять от 15% до 49% (в некоторых случаях до 62%) массы личинок в зависимости от исходного субстрата [25]. Уникальной особенностью жирнокислотного состава *H. illucens* является высокая концентрация лауриновой кислоты (C12:0), содержание которой может достигать 55–65% от общего профиля жирных кислот [41]. Лауриновая кислота обладает выраженными антимикробными, противовирусными и антигрибковыми свойствами, что позволяет использовать масло не только как источник энергии в кормах и сырье для биодизеля, но и как функциональный ингредиент в ветеринарии и косметологии [44].

Меланин, выделяемый из мухи чёрная львинка, представляет собой высокоценный природный биополимер с уникальными физико-химическими свойствами. В организме насекомого выполняет защитные функции и участвует в формировании экзоскелета. Переход личинки в стадию предкуколки и куколки визуально идентифицируется именно по накоплению меланина, что проявляется в потемнении

кутикулы от кремового до темно-коричневого или черного цвета [45]. Особый интерес представляет хитин-меланиновый комплекс, входящий в состав экзоскелета насекомого. Данный продукт ценится за свою биологическую активность, являясь мощной ловушкой для свободных радикалов и защищая клетки от окислительного стресса [46].

Следующим продуктом высокого передела является хитин — линейный полимер N-ацетил-D-глюкозамина, который является вторым по распространенности природным биополимером и важнейшим структурным компонентом экзоскелета насекомых [47]. В организме *H. illucens* хитин интегрирован в сложную матрицу, состоящую из белков и минеральных соединений, обеспечивая механическую жесткость кутикулы [48]. Содержание хитина в биомассе чёрной львинки демонстрирует выраженную стадиезависимую динамику, что обусловлено физиологической потребностью организма в упрочнении покровов на поздних этапах развития [49], что позволяет использовать данный процесс в технологической цепочке культивирования. Данный биополимер, полученный из *H. illucens*, характеризуется: высокой степенью деацетилирования, что определяет его реакционную способность и растворимость, а также выраженной биологической активностью — антимикробными, антивирусными и антигрибковыми свойствами [34,47,48]. Использование хитина, полученного из чёрной львинки и его производных в рамках современных пищевых систем является одним из наиболее перспективных направлений. Благодаря выраженным антимикробным и антигрибковым свойствам, хитозан может включаться в состав активной упаковки для предотвращения порчи продуктов и подавления роста патогенов, таких как *E. coli* и *S. aureus* [14]. Хитозан, как производное хитина, растворенный в кислой среде, применяется для нанесения защитных слоев на свежие продукты, что позволяет существенно продлить срок их хранения [49].

Антимикробные пептиды (АМП) личинок *H. illucens* — это низкомолекулярные белки, обладающие уникальным физико-химическим механизмом подавления патогенов — пептиды избирательно взаимодействуют с отрицательно заряженными мембранами бактериальных клеток (в частности, *E. coli* и *S. aureus*), вызывая их физическое разрушение [50]. Поскольку воздействие носит физический характер, риск развития быстрой устойчивости у микроорганизмов сводится к минимуму. Также АМП обладают высокой специфичностью к патогенам при низкой токсичности для клеток млекопитающих, что делает их перспективными для фармакологии. Говоря про области возможного применения АМП, выделенных из личинок чёрной львинки, можно отметить их использование в качестве иммуномодуляторов в кормах для АПК (птицеводство, животноводство), что позволяет полностью или частично отказаться от ветеринарных антибиотиков и повысить биобезопасность продуктов питания [51].

Рассматривая ключевые термины кластера 2, можно отметить следующий продукт, получаемый в процессе биоконверсии — фрасс, он же зоогукус, побочный продукт, который рассматривается как высокоэффективное органическое удобрение и биомелиорант [52]. Он богат макроэлементами (в среднем N: 4,9%, P: 2,6%, K: 1,7%) [53], при этом процесс биоконверсии увеличивает доступность минеральных веществ в 3 раза по сравнению с исходным сырьем [54]. Особое значение имеет наличие в зоогукусе хитиновых экзудатов, которые стимулируют защитные реакции растений и позволяют подавлять почвенных фитопатогенов, таких как *Ralstonia solanacearum* [55]. Применение фрасса способствует восстановлению здоровья почв.

В Таблице 2 представлены сводные результаты по возможности получения продуктов из *H. illucens* с указанием выхода продукции и ключевых характеристик.

3.2. Анализ временной динамики и глобальных трендов

Анализ временной динамики совместной встречаемости ключевых слов позволяет проследить качественную трансформацию мировых научных интересов в области энтомологической биоконверсии в период с 2020 по 2025 гг. Цветовая дифференциация узлов сети отражает хронологический вектор: от обработки базовых моделей утилизации отходов к прецизионному управлению качеством биомассы и получению субстанций с высокой добавленной стоимостью (Рисунок 3).

Стоит отметить, что несмотря на то, что поисковый запрос охватывал период с 2010 года, визуализация временной динамики демонстрирует распределение терминов в диапазоне 2022–2024 гг. Это обусловлено тем, что программное обеспечение VOSviewer оперирует показателем среднего года публикации. Учитывая взрывной рост числа исследований по теме *Hermetia illucens* в последние три года, статистический вес современных работ доминирует, смещая средние значения большинства ключевых дескрипторов к актуальному периоду.

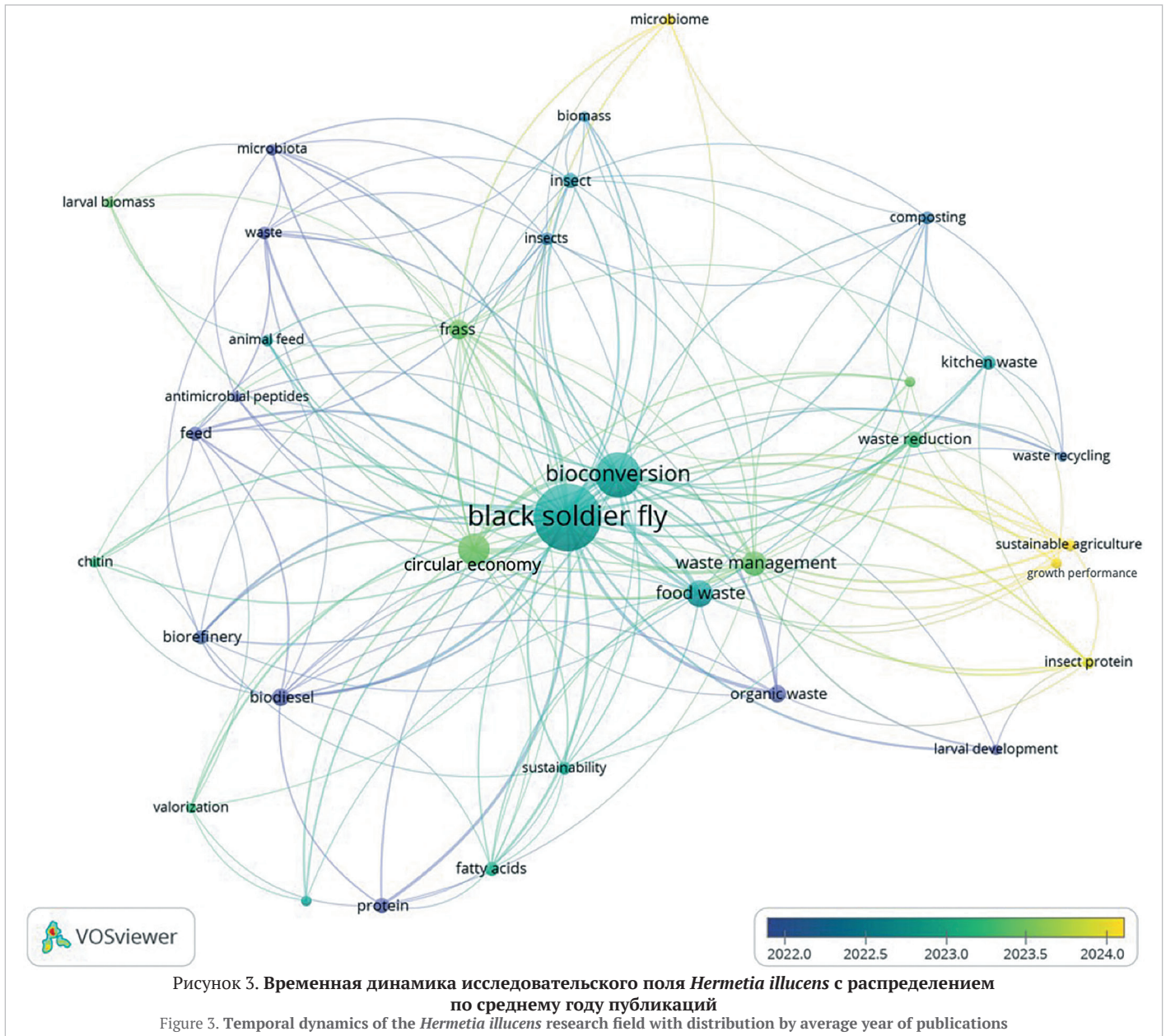
Первый этап (до 2022 г) характеризовался доминированием дескрипторов фундаментального уровня: waste, protein, biodiesel, feed. На данном этапе мировое научное сообщество было сосредоточено на доказательстве эффективности личинок *H. illucens* как инструмента трансформации органического сырья в кормовую белок и сырье для биотоплива. Основной акцент делался на решение экологических задач по сокращению объемов органических отходов.

Второй этап (2023 г.) характеризовался качественной трансформацией исследовательского фокуса, что указывало на трансформацию от объемов утилизации отходов к глубокому изучению биологических механизмов биоконверсии и валоризации побочных продуктов. В центр сетевой визуализации сместились дескрипторы larval biomass, frass, sustainability, valorization и chitin, что свидетельствует о переходе к пониманию личинки как сложной симбиотической

Таблица 2. Потенциал валоризации и ключевые показатели продуктов из биомассы *Hermetia illucens*

Table 2. Valorization potential and key indicators of *Hermetia illucens* biomass products

Продукт	Потенциальный выход (% на СВ)	Ключевые характеристики	Целевые отрасли применения	Жизненная стадия <i>H. illucens</i>	Источники
Энтомопротеин (мука, изолят)	32–63% (на СВ)	Сбалансированный аминокислотный профиль; богат незаменимыми аминокислотами, такими как лейцин, лизин и валин; высокая перевариваемость; альтернатива рыбной муке	АПК (корма для птиц, рыб, свиней); перспективный источник нутриентов и функциональный ингредиент	Личинка; предкуколка	[4,40,45, 56–58]
Липидный концентрат (масло)	5–62% (на СВ)	Высокое содержание лауриновой кислоты (C12:0) до 65%; преобладание насыщенных жирных кислот, доля которых достигает 77–84%; антимикробные, противовирусные и антигрибковые свойства	Фармакология; косметология; биоэнергетика (биодизель)	Личинка; предкуколка	[40,41,44, 47,54,59,60]
Антимикробные пептиды	2–30 мг (из 100 мл гемолимфы)	Термо- и pH-стабильность (до 100 °C и от 2,0 до 10,0 pH); большинство являются положительно заряженными и амфипатическими; действие против резистентных штаммов; низкая вероятность развития резистентности у патогенов и отсутствие токсичности для клеток млекопитающих	Функциональные кормовые добавки для замены кормовых антибиотиков; медицина и фармакология; пищевая промышленность (в качестве биоконсервантов); косметология	Личинка	[15–18, 61–64]
Хитин и хитозан	Хитин: 2,9–33% (на СВ) Хитозан: ~1,56% (на СВ)	Обладает высокой степенью кристалличности; биодegradабельность; химически устойчив и выдерживает температуры разложения в диапазоне 356–392 °C	Биомедицина и фармацевтика (ранозаживляющие покрытия, системы доставки лекарств); сельское хозяйство; пищевая промышленность и упаковка	Куколка; экзудив; имаго	[65–69]
Меланин	1,9–14,3% (на СВ)	Обладает высокой способностью нейтрализовать свободные радикалы; характеризуется высоким молекулярным весом, сильным отрицательным зарядом и гидрофобной природой	Косметология; фармакология; производство биополимеров	Предкуколка; куколка	[67,68,70]



системы. Параллельно с изучением биологических процессов, сформировался вектор на получение продуктов с высокой добавленной стоимостью. Особое внимание стало уделяться зоогумусу не как к отходу, а как эффективному биомелиоранту, также ключевые слова на визуализации данного периода фиксируют переход к моделям каскадной переработки биомассы, обеспечивающим максимальное извлечение нутриентов и биоактивных соединений.

Современный этап развития отрасли (2024–2025 гг.) сформировал вектор исследований, характеризующийся смещением научного интереса от базовой утилизации отходов к прецизионному управлению биохимическим профилем насекомых. Параллельно в актуальной литературе прослеживается тренд на технологическое нормирование и оптимизацию показателей роста (growth performance). Исследования этого периода направлены на установление жестких зависимостей между параметрами среды и эффективностью био-конверсии, что является фундаментом для промышленного масштабирования процесса. В рамках этого направления особую значимость приобретает узкая специализация субстратов, в частности выделение кухонных и ресторанных отходов (kitchen waste) как наиболее нутриентно плотного и биодоступного сырья для реализации концепции данной технологии.

3.3 Анализ плотности исследовательского поля

Для верификации структуры выявленных тематических групп и определения концентрации исследовательских тем была построена карта плотности кластеров (Рисунок 4). В данном режиме программного обеспечения цвет каждой точки определяется плот-

ностью ключевых слов в её окрестности, при этом веса элементов (частота встречаемости) суммируются и нормируются для каждого кластера отдельно.

Проанализировав карту плотности, можно отметить, что максимальная яркость и плотность наблюдаются в центре карты вокруг дескрипторов black soldier fly, bioconversion и circular economy. Это подтверждает, что фундаментальная концепция био-конверсии отходов является наиболее проработанной и консолидированной частью мирового научного знания. Высокая концентрация в зоне waste management и food waste указывает на то, что данные типы субстратов являются эталонными для отрасли.

Группа терминов composting, kitchen waste и waste reduction образует отчетливую, но менее плотную зону в правой части карты. Это указывает на то, что, хотя направления утилизации специфических отходов (например, кухонных) активно развиваются, они всё еще находятся в стадии накопления эмпирических данных и не достигли такой степени теоретической плотности, как центральное технологическое ядро.

Периферийное расположение и умеренная плотность узлов antimicrobial peptides, feed и chitin отражают специфику современного этапа развития. Несмотря на то, что выделение АМП и хитина являются актуальными трендами, их плотность на общей карте пока ниже, чем у привычных продуктов — белка, липидов и зоогумуса. Это подтверждает высокую научную новизну и возможности для глубоких исследований в области направленного культивирования биоактивных веществ.



Рисунок 4. Карта плотности мирового исследовательского поля *Hermetia illucens* в разрезе тематических кластеров
Figure 4. Cluster density map of the *Hermetia illucens* world research field by thematic clusters

4. Выводы

Проведенный систематический анализ 283 научных работ за период 2010–2025 гг. позволил выявить структуру мирового исследовательского поля *Hermetia illucens* и определить ключевые векторы развития технологий биоконверсии в рамках циркулярной биоэкономики.

В структуре предметной области выделено четыре функциональных кластера. Установлено, что наиболее масштабным является вектор валоризации отходов (Кластер 1), ориентированный на получение продуктов высокого передела. Кластеры, посвященные биологическим механизмам (Кластер 2) и технологическому нормирова-

нию (Кластер 3), формируют необходимый фундамент для перехода от эмпирических наблюдений к управляемому синтезу биомассы.

Анализ временной динамики (2020–2025 гг.) подтверждает качественную трансформацию отрасли: от решения базовых задач утилизации органики к реализации концепции направленного культивирования с автоматизацией процессов. Глобальные тренды указывают на то, что преодоление обозначенного во введении технологического разрыва (нестабильности состава и дороговизны ручного труда) лежит в плоскости автоматизации и цифровизации процессов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Caivano, I., Pucciarelli, V., Franco, A., Lomonaco, G., Chiummiento, L., Rossano, R. et al. (2025). From insect lipids to biodiesel through the bioconversion process of vegetable by-products. *Journal of Environmental Management*, 393, Article 126976. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126976>
- Eggink, K. M., Lund, I., Pedersen, P. B., Hansen, B. W., Dalsgaard, J. (2022). Bio-waste and by-products as rearing substrates for black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae: Effects on larval body composition and performance. *PLoS One*, 17(9), Article e0275213. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275213>
- Коффт, Н. (2025). Органические отходы: экологическая бомба замедленного действия или ресурс на миллиарды? Электронный ресурс <https://journal.ecostandard.ru/eco/kontekst/organicheskie-otkhody-ekologicheskaya-bomba-zamedlennogo-deystviya-ili-resurs-na-milliardy/> Дата доступа 28.02.2026. [Kofft, N. (2025). Organic waste: An ecological time bomb or a resource worth billions? Retrieved from <https://journal.ecostandard.ru/eco/kontekst/organicheskie-otkhody-ekologicheskaya-bomba-zamedlennogo-deystviya-ili-resurs-na-milliardy/> Accessed February 28, 2026 (In Russian)]
- Triunfo, M., Taft, E., Guarnieri, A., Salvia, R., Scieuzo, C., Hahn, T. et al. (2022). Characterization of chitin and chitosan derived from *Hermetia illucens*, a further step in a circular economy process. *Scientific Reports*, 12, Article 6613. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10423-5>
- Sanjaya, A. S., Nugroho, R. A., Meicahyanti, I., Anastasia, P. A. D., Jawa, J. (2025). Analisis kadar proksimat tepung maggot (*Hermetia illucens*) dari hasil ekstraksi asam lemak dengan metode sokletasi menggunakan pelarut etanol dan metanol. *Jurnal Chemurgy*, 9(1), 16–23. [Sanjaya, A. S., Nugroho, R. A., Meicahyanti, I., Anastasia, P. A. D., Jawa, J. (2025). Analysis of the proximate content of maggot flour (*Hermetia illucens*) from the extraction of fatty acids by sokletation method using ethanol and methanol solvents. *Jurnal Chemurgy*, 9(1), 16–23. (In Indonesian)]
- Ovie, K. A., Okpu, P., Oster, F. N., Emuesiri, A. (2025). Evaluation of proximate composition of varying black soldier Fly (BSF) larvae as an alternative protein source. *Journal of Science Research and Reviews*, 2(4), 1–8. <https://doi.org/10.70882/josrar.2025.v2i4.95>
- Hem, S., Toure, S., Sagbla, C., Legendre, M. (2008). Bioconversion of palm kernel meal for aquaculture: Experiences from the forest region (Republic of Guinea). *African Journal of Biotechnology*, 7(8), 1192–1198.
- Li, Q., Zheng, L., Qiu, N., Cai, H., Tomberlin, J.K., Yu, Z. (2011). Bioconversion of dairy manure by black soldier fly (*Diptera: Stratiomyidae*) for biodiesel and sugar production. *Waste Management*, 31(6), 1316–1320. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.01.005>
- Ng, J.M.H., Liew, C.S., Sobri, M.Z.A., Sahrin, N.T., Ramli, A., Lim, J.W. et al. (2025). Kinetics-based activation energy of one-step optimized transesterification in producing quality biodiesel from black soldier fly larvae oil. *Chemical*

- Engineering Research and Design*, 218, 428–437. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2025.04.045>
10. Mohan, K., Sathishkumar, P., Rajan, D. K., Rajarajeswaran, J., Ganesan, A. R. (2023). Black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae as potential feedstock for the biodiesel production: Recent advances and challenges. *Science of the Total Environment*, 859(Part 1), Article 160235. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160235>
 11. Camperio, J., Suarez, J. A., Simonton, J., Paresky, E., Parodi, J., Benetti, D. D. (2025). Valorizing organic waste through black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*): A sustainable solution for aquafeeds with key nutrients and natural bioactive polyphenols. *Sustainability*, 17(5), Article 1788. <https://doi.org/10.3390/su17051788>
 12. Melati, I. S., Heriyanti, A. P., Pitaloka, L. K., Muttaqin, M. R. N. (2026). Circular bioeconomy poultry feed pellets from food waste using black soldier fly larvae. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 27(1), 53–64. <https://doi.org/10.12912/27197050/214620>
 13. González-Lara, H., Parra-Pacheco, B., Rico-García, E., Aguirre-Becerra, H., Feregrino-Pérez, A. A., García-Trejo, J. F. (2025). Black soldier fly culture as a source of chitin and chitosan for its potential use in concrete: An Overview. *Polymers*, 17(6), Article 717. <https://doi.org/10.3390/polym17060717>
 14. Triunfo, M., Guarnieri, A., Ianniciello, D., Hahn, T., Zibek, S., Scieuzo, C. et al. (2025). Secondary products and bioactive compounds of *Hermetia illucens*: Extraction, chemical properties, and potential application of chitin and chitosan. Chapter in a book: *The Black Soldier Fly (Hermetia illucens): Sustainable Applications in Food, Feed, and Beyond*. Amsterdam: Elsevier, 2025. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-29896-7.00009-3>
 15. Szczepanik, K., Świątkiewicz, M. (2024). *Hermetia illucens* as a source of antimicrobial peptides – A review of *in vitro* and *in vivo* studies. *Annals of Animal Science*, 24(1), 3–16. <https://doi.org/10.2478/aoas-2023-0071>
 16. Herman, N., Vitenberg, T., Hayouka, Z., Opatovsky, I. (2024). Regulation of antimicrobial peptides in *Hermetia illucens* in response to fungal exposure. *Scientific Reports*, 14, Article 29561. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80133-7>
 17. Yuan, R.-X., Ma, X.-Y., Lv, Y., Si, H.-B. (2026). Molecular diversity, structure – function relationship, mechanism of action, and transformative potential of black soldier fly antimicrobial peptides against multidrug-resistant pathogens. *Current Issues in Molecular Biology*, 48(1), Article 62. <https://doi.org/10.3390/cimb48010062>
 18. Scieuzo, C., Giglio, F., Rinaldi, R., Lekka, M. E., Cozzolino, F., Monaco, V. et al. (2023). *In vitro* evaluation of the antibacterial activity of the peptide fractions extracted from the hemolymph of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae). *Insects*, 14(5), Article 464. <https://doi.org/10.3390/insects14050464>
 19. Sharma, R. D., Thangadurai, P. (2025). Sustainable bioprocessing of *Hermetia illucens* exuviae into structurally defined chitoooligosaccharides within a circular biorefinery framework. *Bioresour. Technology Reports*, 32, Article 102400. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102400>
 20. Hosseingholilou, B., Ghoobadian, B., Motevali, A., Kamali, M., Birkved, M., Khoshn-evisan, B. (2025). Environmental sustainability assessment of a biorefinery platform utilizing black soldier fly larvae for organic waste valorization. *Sustainable Production and Consumption*, 58, 46–74. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.06.007>
 21. Singh, C. N., Healy, L., Chanu, N.S., Dwivedi, M. (2025). Design of value chains for insect processing biorefinery. Chapter in a book: *Innovative Biorefinery Processes for Agri-Food Value Chains*. Amsterdam: Elsevier, 2025. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-28810-4.00003-7>
 22. Li, Z., Zhou, Y., Lv, L., Long, Y., Dong, M., Xiao, Q. et al. (2025). Host-mediated environmental microbiome recruitment by black soldier fly (*Hermetia illucens*) enhances waste biotransformation. *Waste Management*, 204, Article 114886. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114886>
 23. Klüber, P., Gurusiga, F. F., Hurka, S., Vilcinskas, A., Tegtmeyer, D. (2024). Turning trash into treasure: *Hermetia illucens* microbiome and biodegradation of industrial side streams. *Applied and Environmental Microbiology*, 90(11), Article e00991–24. <https://doi.org/10.1128/aem.00991-24>
 24. Lemme, A., Klüber, P. (2024). Rethinking amino acid nutrition of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) based on insights from an amino acid reduction trial. *Insects*, 15(11), Article 862. <https://doi.org/10.3390/insects15110862>
 25. Scala, A., Cammack, J. A., Salvia, R., Scieuzo, C., Franco, A., Bufo, S.A. et al. (2020). Rearing substrate impacts growth and macronutrient composition of *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae) larvae produced at an industrial scale. *Scientific Reports*, 10, Article 19448. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76571-8>
 26. Singh, A., Marathe, D., Raghunathan, K., Kumari, K. (2022). Effect of different organic substrates on selected life history traits and nutritional composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*). *Environmental Entomology*, 51(1), 182–189. <https://doi.org/10.1093/ee/nvab135>
 27. Montevecchi, G., Macavei, L. I., Zanelli, E., Benassi, G., Pinotti, G., D'Arco, S. et al. (2023). Seasonal variability of the HO.RE.CA. food leftovers employed as a feeding substrate for black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae and effects on the rearing performance. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 33, Article 101061. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101061>
 28. Cattaneo, A., Meneguz, M., Dabbou, S., Tambone, F., Scaglia, B. (2024). Local circular economy: BSF insect rearing in the Italian Agri-Food Industry. *Waste Management*, 179, 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.03.016>
 29. Chapagaee, P., Thapa, S., Shrestha, S., Puri, B., Ghimire, A., Bist, D. R. et al. (2026). Valorisation of organic wastes through black soldier fly (*Hermetia illucens*) Larvae: Impacts on growth, nutritional composition, and bioconversion efficiency. *Waste Management Bulletin*, 4(1), Article 100278. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2025.100278>
 30. Wang, T., Yin, T., Liu, X., Huang, Z. (2025). Facilitating bioconversion of kitchen waste by *Hermetia illucens* L. for enhanced production of insect protein: The key role of probiotic pretreatment. *Food and Fermentation Industries*, 51(5), 157–164. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.041038> (In Chinese).
 31. Fuso, A., Barbi, S., Macavei, L. I., Luparelli, A. V., Maistrello, L., Montorsi, M. et al. (2021). Effect of the rearing substrate on total protein and amino acid composition in black soldier fly prepupae intended for animal feed. *Foods*, 10(8), Article 1773. <https://doi.org/10.3390/foods10081773>
 32. Kharel, N., Gautam, B., Pokhrel, M. R., Tiwari, S., Barsila, S. R., Patten, M. A. et al. (2026). Density and substrate-dependent performance of black soldier fly larvae, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) reared on locally available biowastes in Nepal: Effects on growth, bioconversion, and nutritional composition. *Cleaner Waste Systems*, 13, Article 100482. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2026.100482>
 33. Li, G. (2024). Optimization of breeding and economic benefit analysis based on self-supply of black soldier fly eggs. *Environmental Sanitation Engineering*, 32(6), 50–56. <https://doi.org/10.19841/j.cnki.hjwsgc.2024.06.007>
 34. Nayak, A., Rühl, M., Klüber, P. (2024). *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae): Need, potentiality, and performance measures. *Agriculture*, 14(1), Article 8. <https://doi.org/10.3390/agriculture14010008>
 35. Cheng, J. Y. K., Chiu, S. L. H., Lo, I. M. C. (2017). Effects of moisture content of food waste on residue separation, larval growth and larval survival in black soldier fly bioconversion. *Waste Management*, 67, 315–323. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.046>
 36. Nahrowi, Dafri, I., Sabrina, D. N., Ridla, M., Jayanegara, A., Martin, R. S. H. et al. (2025). Performance and nutritional quality of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae fed diets with varying crude protein and carbohydrate ratios. *Journal of Insects as Food and Feed*, 11(16), 2939–2953. <https://doi.org/10.1163/23524588-bja10242>
 37. Arya, E. S., Srinivasan, M., Shanthi, M., Saravanan, S., Mini, M.L. (2025). Black soldier fly (*Hermetia illucens*): Driving circular agriculture through organic waste recovery. *Plant Science Today*, 12(5), Article 8629. <https://doi.org/10.14719/pst.8629>
 38. Cai, M., Zhang, K., Zhong, W., Liu, N., Wu, X., Li, W. et al. (2019). Bioconversion-composting of golden needle mushroom (*Flammulina velutipes*) root waste by black soldier fly (*Hermetia illucens*, Diptera: Stratiomyidae) larvae, to obtain added-value biomass and fertilizer. *Waste and Biomass Valorization*, 10(2), 265–273. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0063-2>
 39. Wu, N., Yu, X., Liang, J., Mao, Z., Ma, Y., Wang, Z. et al. (2025). A full recycling chain of food waste with straw addition mediated by black soldier fly larvae: Focus on fresh frass quality, secondary composting, and its fertilizing effect on maize. *Science of the Total Environment*, 885, Article 163586. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163586>
 40. Surendra, K. C., Tomberlin, J. K., van Huis, A., Cammack, J. A., Heckmann, L.-H. L., Khanal, S. K. (2020). Rethinking organic wastes bioconversion: Evaluating the potential of the black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF). *Waste Management*, 117, 58–80. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.050>
 41. Rawski, M., Mazurkiewicz, J., Kierończyk, B., Józefiak, D. (2020). Black soldier fly full-fat larvae meal as an alternative to fish meal and fish oil in Siberian sturgeon nutrition: The effects on physical properties of the feed, animal growth performance, and feed acceptance and utilization. *Animals*, 10(11), Article 2119. <https://doi.org/10.3390/ani10112119>
 42. Mohammad, S. F., Shah, A.A., Wanapat, M., El-Mogy, M.M., Al-Hoshani, N., Alyami, E.M. (2026). Utilizing insects to convert waste into nutrients for sustainable feed and food production. *Entomological Research*, 56(2), Article e70105. <https://doi.org/10.1111/1748-5967.70105>
 43. Caisin, L. (2025). Waste-to-feed bioconversion using *Hermetia illucens* Larvae: Current insights and prospects. *Open Veterinary Journal*, 15(11), 5427–5448. <https://doi.org/10.5455/OVJ.2025.v15.i11.1>
 44. Zandi-Sohani, N., Tomberlin, J. K. (2024). Comparison of growth and composition of black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae reared on sugarcane by-products and other substrates. *Insects*, 15(10), Article 771. <https://doi.org/10.3390/insects15100771>
 45. Logan, L. A. P., Latty, T., Roberts, T. H. (2021). Effective bioconversion of farmed chicken products by black soldier fly larvae at commercially relevant growth temperatures. *Journal of Applied Entomology*, 145(6), 621–628. <https://doi.org/10.1111/jen.12878>
 46. Almeida, C., Rijo, P., Rosado, C. (2020). Bioactive compounds from *Hermetia illucens* larvae as natural ingredients for cosmetic application. *Biomolecules*, 10(7), Article 976. <https://doi.org/10.3390/biom10070976>
 47. Smets, R., Verbinnen, B., De Voorde, I.V., Aerts, G., Claes, J., Van Der Borgh, M. (2020). Sequential extraction and characterisation of lipids, proteins, and chitin from black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae, prepupae, and pupae. *Waste and Biomass Valorization*, 11(12), 6455–6466. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00924-2>
 48. Fischer, H., Romano, N., Sinha, A. K. (2021). Conversion of spent coffee and donuts by black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae into potential resources for animal and plant farming. *Insects*, 12(4), Article 332. <https://doi.org/10.3390/insects12040332>
 49. Farina, P., Abenaim, L., Conti, B. (2021). Enemies and allies: The different roles of insects towards fruit and vegetable loss and waste. *Agrochimica*, 65(Special Issue), 9–16.
 50. Шевченко, Н. И., Гусева, Ю. А., Васильев, А. А., Пигина, С. Ю., Николаев, С. И. (2024). Альтернатива антибиотиков — антимикробные пептиды черной львинки (*Hermetia Illucens*) (обзор). *Известия Нижневолжского Агроуниверситетского Комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*, 1(73), 201–210. [Shevchenko, N. I., Guseva, Yu. A., Vasiliev, A. A., Pigina, S. Yu., Nikolaev, S. I. (2024). Alternative to antibiotics — Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) antimicrobial peptides (Review). *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education* 1(73), 201–210. (In Russian)]
 51. Xia, J., Ge, C., Yao, H. (2021). Antimicrobial peptides from black soldier fly (*Hermetia illucens*) as potential antimicrobial factors representing an alternative to antibiotics in livestock farming. *Animals*, 11(7), Article 1937. <https://doi.org/10.3390/ani11071937>
 52. De Santis, E., de Iudicibus, A., Lecce, F., De Mei, M., Petrazzuolo, F., Del Giudice, A., Carnevale, M. et al. (2024). A multidisciplinary approach for the development of a supply chain in biomass conversion of agrifood waste mediated by larvae of *Hermetia illucens* L.: From rearing to by-product exploitation. *Agriculture*, 14(7), Article 1010. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071010>
 53. Magee, K., Halstead, J., Small, R., Young, I. (2021). Valorisation of organic waste by-products using black soldier fly (*Hermetia illucens*) as a bio-converter. *Sustainability*, 13(15), Article 8345. <https://doi.org/10.3390/su13158345>

54. Hanafi, T., Meziane, K. Z., Megateli, S., Moussaoui, B., Guemou, L., Reghioui, B. (2024). Bio-treatment of cheese whey by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) reared in Algeria. *Journal of Agriculture and Applied Biology*, 5(1), 125–141. <https://doi.org/10.11594/jaab.05.01.10>
55. Ji, X., Zhou, S., Chen, W., Cao, B., Sun, Y., Che, Q. et al. (2025). Black soldier fly and microbiome collaborate to bioconvert the tofu whey water in an efficient and environment-friendly manner. *Journal of Water Process Engineering*, 68, Article 106888. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106888>
56. Ganvir, K. P., Darvekar, A. N., Raut, V. D., Thorat, R. K. (2022). Effect of locally generated food waste on bioconversion and nutrient parameters of black soldier fly larvae, *Hermetia illucens* L. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 10(5), 108–116. <https://doi.org/10.22271/j.ento.2022.v10.i6b.9096>
57. Azizah, A. A., Ekawati, A. W., Nursyam, H. (2020). Potential the black soldier fly (*Hermetia illucens*) in feed formulation for growth of common carp (*Cyprinus carpio* L.). *Research Journal of Life Science*, 7(3), 154–161. <https://doi.org/10.21776/ub.rjls.2020.007.03.5>
58. Giannetto, A., Oliva, S., Riolo, K., Savastano, D., Parrino, V., Cappello, T. et al. (2020). Waste valorization via *Hermetia illucens* to produce protein-rich biomass for feed: Insight into the critical nutrient taurine. *Animals*, 10(9), Article 1710. <https://doi.org/10.3390/ani10091710>
59. Leni, G., Del Vecchio, L., Dellapina, C., Moliterni, V. M. C., Caligiani, A., Cirilini, M. (2024). Black soldier fly larvae grown on hemp fiber: Nutritional composition and production of potential bioactive peptides. *Macromol*, 4(1), Article 0007. <https://doi.org/10.3390/macromol4010007>
60. Sibonje, J., Riungu, J., James, K. (2023). Bioconversion of faecal and kitchen waste using black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*): Mass balance process. *African Journal of Science, Technology and Social Sciences*, 2(2), 19–29. <https://doi.org/10.58506/ajstss.v2i2.163>
61. Hoc, B., Genva, M., Fauconnier, M.-L., Lognay, G., Francis, F., Megido, R. C. (2020). About lipid metabolism in *Hermetia illucens* (L. 1758): On the origin of fatty acids in prepupae. *Scientific Reports*, 10(1), Article 11916. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68784-8>
62. Widiyastuti, T., Rahayu, S., Suryapratama, W., Suhartati, F. M. (2024). Nutrient profile, protease and cellulase activities of protein extracted from black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae reared on various substrates. *Online Journal of Animal and Feed Research*, 14(5), 309–320. <https://doi.org/10.51227/ojaf.2024.36>
63. Alvarez, D., Wilkinson, K.A., Treilhou, M., Téné, N., Castillo, D., Sauvain M. (2019). Prospecting peptides isolated from black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) With antimicrobial activity against *Helicobacter pylori* (*Campylobacteres*: Helicobacteraceae). *Journal of Insect Science*, 19(6), Article 17. <https://doi.org/10.1093/jisesa/iez120>
64. Di Somma, A., Moretta, A., Cané, C., Scieuzo, C., Salvia, R., Falabella, P. et al. (2022). Structural and functional characterization of a novel recombinant antimicrobial peptide from *Hermetia illucens*. *Current Issues in Molecular Biology*, 44(1), 1–13. Article 0001. <https://doi.org/10.3390/cimb44010001>
65. Zabulione, A., Šalaševičienė, A., Makštutienė, N., Šarkinas, A. (2023). Exploring the antimicrobial potential and stability of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae fat for enhanced food shelf-life. *Gels*, 9(10), Article 793. <https://doi.org/10.3390/gels9100793>
66. Van Moll, L., De Smet, J., Paas, A., Tegtmeier, D., Vilcinska, A., Cos, P. et al. (2022). *In vitro* evaluation of antimicrobial peptides from the black soldier fly (*Hermetia illucens*) against a selection of human pathogens. *Microbiology Spectrum*, 10(1), Article e01664–21. <https://doi.org/10.1128/spectrum.01664-21>
67. Peng, T.H., Wei, L.K., Chiang, E.C.W., Yoon, M.S.O. (2022). Antibacterial properties of chitosan isolated from the black soldier fly, *Hermetia illucens*. *Sains Malaysiana*, 51(12), 3923–3935. <https://doi.org/10.17576/jsm-2022-5112-05>
68. Yuan, B. -Q., Yu, T.-H., Chen, S.-C., Zhang, Z.-Q., Guo, Z.-K., Huang, G.-X. et al. (2024). Physical and chemical characterization of chitin and chitosan extracted under different treatments from black soldier fly. *International Journal of Biological Macromolecules*, 279(Part 2), Article 135228. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135228>
69. Khayrova, A., Lopatin, S. (2022). The potential of *Hermetia Illucens* as a source of chitin, chitosan and their melanin complexes. *Polymer Science: Peer Review Journal*, 3(4) Article 000568. <https://doi.org/10.31031/PSPRJ.2022.03.000568>
70. Schäfer, H. L., Gandras, J., Schneider, L., Witthohn, M., Troidl, K., Muffler, K. et al. (2025). Analysis, properties, and applications of insect-derived chitosan: a sustainable path to functional polysaccharide materials. *Gels*, 11(4), Article 291. <https://doi.org/10.3390/gels11040291>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Гладышева Марина Сергеевна — аспирант, факультет экотехнологий, Университет ИТМО 191002, Санкт-Петербург. ул. Ломоносова, 9 E-mail: msgladysheva@itmo.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0007-6764-7991 * автор для контактов	Marina S. Gladysheva , Graduate Student, Faculty of Ecotechnologies (GreenTech), ITMO University 9, Lomonosova Str., St. Petersburg, 191002, Russia E-mail: msgladysheva@itmo.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0007-6764-7991 * corresponding author
Молодкина Нелли Ринатовна — кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, факультет экотехнологий, Университет ИТМО 191002. Санкт-Петербург. ул. Ломоносова, 9 E-mail: nrmolodkina@itmo.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6956-4547	Nelli R. Molodkina , Candidate of Technical Sciences, Docent, Head of the Laboratory, Faculty of Ecotechnologies (GreenTech), ITMO University 9, Lomonosova Str., St. Petersburg, 191002, Russia E-mail: nrmolodkina@itmo.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6956-4547
Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.